

# 基于 GIS 的气象要素插值方法比较研究

王新宇<sup>1 2</sup>, 黄鹏程<sup>1 2</sup>

( 1.兰州交通大学 测绘与地理信息学院,甘肃 兰州 730070; 2.甘肃省地理国情监测工程实验室,甘肃 兰州 730070)

**摘 要:** 气温是重要的气象要素之一,空间插值为离散的气温数据转换为连续的空间曲面提供了有效方法,从而可以提供每个栅格上的气温要素资料。本研究在 ArcGIS 软件支持下,分别利用反距离权重法、张力样条函数法和普通克里格插值法对 2010 年全国 660 个气象站观测的年平均气温进行空间插值,并利用交叉验证法对插值精度进行了验证。结果表明:既考虑了距离又考虑了已知样本点空间位置及与待插值点的空间方位关系的普通克里格插值精度明显优于反距离权重法和张力样条函数插值法。本研究结果对全国气象要素的空间插值应用具有一定参考意义。

**关键词:** GIS; 气温; 空间插值; 普通克里格

中图分类号: P208

文献标识码: A

文章编号: 1672-5867( 2020) 05-0167-04

## Comparative Study of Interpolation Methods of Meteorological Factors Based on GIS

WANG Xinyu<sup>1 2</sup>, HUANG Pengcheng<sup>1 2</sup>

( 1.Faculty of Geomatics , Lanzhou Jiaotong University , Lanzhou 730070 , China;

2.Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring , Lanzhou 730070 , China)

**Abstract:** Air temperature is one of the important meteorological factors. Spatial interpolation provides an effective method of converting discrete temperature data to continuous spatial surface , and provides information about the temperature factors of each grid. Under the support of ArcGIS software , the research interpolated the annual average temperature about 2010 collecting from 660 meteorological stations in China utilizing inverse distance weighted method , tension spline function and ordinary Kriging interpolation method and validated the precision of interpolation through cross validation method. The results showed that the interpolation accuracy of ordinary Kriging method , which takes into account the distance and spatial direction relationship between sample point and interpolated point and spatial location of interpolated point , is better than inverse distance weighting method and the tension spline function interpolation method. The findings can provide certain reference in some extent for the application about spatial interpolation of meteorological elements in China.

**Key words:** GIS; temperature; spatial interpolation; ordinary Kriging

## 0 引 言

气温是用来衡量地球表面大气温度分布状况和变化态势的重要指标,也是气候变化研究的最基本要素,对生态系统的结构和功能具有非常重要的影响。近年来,随着高温干旱和低温雨雪等极端天气的出现,不断引发社会公众对极端天气的关注。IPCC 第五次评估报告指出,全球几乎所有地区都经历了升温过程,变暖体现在地球表面气温和海平面的上升等方面。由于经济成本的制约和地理条件的限制,很多研究区的气温数据都难以获取,

通常只能采集到有限个气象站点的气温数据。为了得到研究区内观测点以外的气象观测数据,研究人员通常会在已有观测数据的气象站点基础上使用空间插值方法进行估算。因此,空间插值为离散的气温数据转换为连续的空间曲面提供了有效方法,从而可以提供每个计算栅格的气象要素资料,生成研究区气象要素的空间分布图,从而达到研究目的。

本文以 2010 年全国 660 个气象站点年平均气温为基础数据,分别采用反距离权重法、张力样条函数插值法、普通克里格插值法进行空间插值,探讨不同插值方法对

收稿日期: 2018-12-24

作者简介: 王新宇( 1991- ) 男,甘肃白银人,地图学与地理信息系统专业硕士研究生,主要研究方向为遥感地物提取与应用。

研究全国年均气温变化空间分布特征的影响,并分析全国年均气温的空间变异规律。

## 1 资料与方法

### 1.1 数据来源

本研究数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://data.cma.cn/>),包括气象台站信息文档和年均温度数据。台站信息文档包括 1951—2007 年中国 756 个地面气候台站信息,提供了台站号、所属省份、经纬度、观测海拔高度、观测起止时间及相关信息。

### 1.2 研究方法

空间插值的理论依据是 Tobler 地理学定律,即空间上距离小的地理数据比那些空间距离更大的数据有更大的相似性。目前,用于气象要素空间插值的方法有很多,其中,反距离权重法、样条插值法和克里格插值系列方法属于精确插值。故本文选取考虑了空间自相关性并且是精确插值的反距离权重法、样条插值法和克里格插值法,并对 3 种空间方法的插值效果进行评价,分析全国年均气温的空间变异规律。

1) 反距离权重法。基于“地理学第一定律”的基本假设,利用影响插值变量范围内的一系列空间采样点的线性权重组合来确定需插入的特征值,它认为与未采样点距离最近的样本点对未采样点的特征值的影响最大,其影响的权重大小与距离成反比。数学计算公式如下所示:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{(d_i)^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_i)^p}} \quad d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (1)$$

式中, $z$  是估计值, $z_i$  是第  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) 个样本值, $d_i$  是估计点与插值点的距离, $p$  是距离的幂,它的选择标准是最小平均绝对误差最低的幂值视为最佳幂值。幂值越高,插值效果越平滑,通常认为,幂的合理范围为 0.5—3。

2) 样条函数法。样条函数是用函数来逼近曲面的一种方式,其种类较多,常用的有规则样条函数、张力样条函数等。规则样条生成一个平滑、渐变的表面,插值结果可能会超出样本点的取值范围较多,而张力样条函数根据要生成的现象的特征生成一个比较坚硬的表面,插值结果更接近限制在样本点的取值范围内。这种方法适用于逐渐变化的表面,如温度、高程、地下水位高度或污染浓度等。本研究采用张力样条函数插值,张力样条函数有以下的表达形式:

$$a + \sum_{i=1}^n A_i R(d_i) \quad (2)$$

式中  $a$  为趋势函数。基本函数为:

$$R(d) = -\frac{1}{2\pi\varphi^2} \left[ \ln\left(\frac{d\varphi}{2}\right) + c + k_0(d\varphi) \right] \quad (3)$$

式中, $\varphi$  为张力样条函数法用到的权重。

3) 克里格(Kriging)法。克里格法是一种以变异函数理论与结构分析为基础的求最优线性无偏插值估计量的方法,是根据待插值点与邻近样本点的空间分布位置及各样本数据的空间分布结构,对每一样本值分别赋予一定的系数,最后进行加权平均来估计待插值点变量值的方法。法国统计学家 Matheron 实现了该插值方法的理论化、系统化研究,给出了 Kriging 插值的一般公式 (Matheron G, 1963)。克里格插值法的公式为:

$$z(x_0) = \sum_{j=1}^n \lambda_j z(x_j) \quad (4)$$

式中, $z(x_j)$  为样本观测值,它们分别位于空间域内  $x_j$  位置; $x_0$  是一个待测点; $\lambda_i$  为权,并且其和等于 1。为满足无偏性和最优性两个条件,通过建立如下克里格方程组来确定权重系数:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j C(v_i, v_j) - \mu = C(v_i, V) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $C(v_i, v_j)$  为气象站点之间的协方差函数, $C(v_i, V)$  为气象站点与插值点之间的协方差函数, $\mu$  为拉格朗日乘数。权重值是根据半方差图的综合分析获取来确定,依据数理统计上最优与无偏的要求,运用拉格朗日最小化的数学分析原理,可推理出权重值与半方差间的映射公式。

#### 4) 空间精度评价

为了验证各模型的精确度以及站点分布对插值结果的影响,研究采用在站点交叉验证法来确定年均气温的最优插值方法。该方法的优点在于最大限度地利用了观测值,而避免了因预留用于验证精度的观测值减少了参与插值过程的观测值数量而对总体精度的负面影响。交叉验证法常用于评价精度的参数是平均误差 (Mean Error, ME) 和均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE)。平均误差总体反映估计误差的大小,均方根误差可以反映利用样本点的估算灵敏度和极值效应。交叉验证能够准确检验不同插值方式间的相对精度,精度评价指标的计算公式如下:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - z_i) \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - z_i)^2} \quad (7)$$

式中, $m_i$  为第  $i$  个站点年均气温的实际观测值; $z_i$  为第  $i$  个站点年均气温的空间插值结果, $n$  为参与空间插值验证的站点数。

## 2 数据结果处理与分析

### 2.1 全国年均气温空间结果

#### 1) 反距离权重法

本文通过不断变换反距离权重法中的权重值来确定插值效果最佳的权值(见表 1)。当权重为 1.2 时,反距离

权重法的均方根误差( RMS) 最小, 因此, 权重参数为 1.2 的插值方法是相对最优的反距离权重法。

表 1 反距离权重法中权重的设置

Tab.1 Weight setting in inverse distance weight method

权重	Mean	RMS
1.0	0.051 8	2.464 4
1.1	0.050 9	2.462 9
1.2	0.049 8	2.462 4
1.3	0.048 7	2.462 8
1.4	0.047 5	2.463 4
2.0	0.040 0	2.492 3

2010 年东北地区西北部和青藏高原地区年均气温较低, 两广地区年均气温较高, 年均气温整体呈现出自西北向东南增加的趋势。权重参数为 1.2 的反距离权重法的交叉验证结果( 如图 1 所示), 平均误差为 0.049 8, 均方根误差为 2.462 4。由于受极值点或点集群的影响, 反距离权重法的插值结果存在明显的“牛眼”现象。

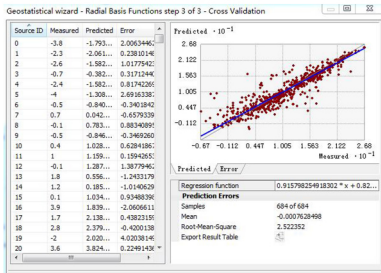


图 1 反距离权重法交叉验证结果

Fig.1 Cross validation results of inverse distance weighting method

2) 样条函数法

本文通过不断变换张力样条函数法中的 Kernel 参数值来确定插值效果最佳的方法( 见表 2)。当 Kernel 参数为 6 时, 张力样条函数法的平均误差( ME) 最接近于 0, 因此, Kernel 参数为 6 的插值方法是相对最优的张力样条函数法。

表 2 张力样条函数法中 Kernel 参数的设置

Tab.2 Kernel parameter setting in tension spline function method

Kernel 参数	Mean	RMS
5	-0.003 0	2.547 3
6	-0.000 8	2.522 4
7	0.001 2	2.503 8
8	0.002 8	2.489 6

2010 年东北地区西北部、祁连山南部和青藏高原地区中部年均气温较低, 两广地区和云南局部区域年均气温较高, 年均气温整体呈现出自西北向东南增加的趋势。Kernel 参数为 6 的张力样条函数法的交叉验证结果( 如图 2 所示) 的平均误差为 -0.000 8, 均方根误差为 2.522 4。张力样条函数法的插值结果在较大范围内呈现出明显的趋势, 但局部地区依然受极值点的影响。

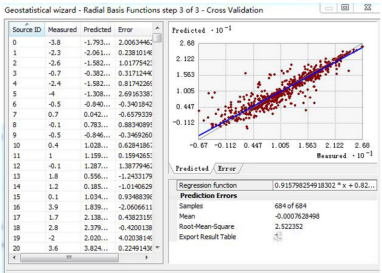


图 2 张力样条函数法交叉验证结果

Fig.2 Cross validation results of tension spline function method

3) 克里格( Kriging) 法

通过 QQPlot 分布图分析, 本研究数据接近于一条直线, 因此, 它接近服从正态分布。其不存在主导趋势, 因此, 选用普通克里格插值法。通过移动半变异/协方差模型( 如图 3 所示) 中搜索方向, 确定块金值为 3.445 2。

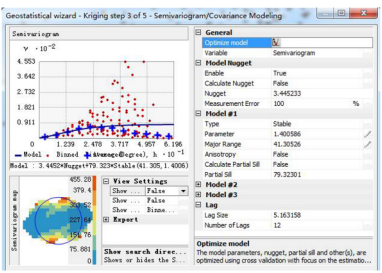


图 3 半变异/协方差模型

Fig.3 Model of semi-variation/covariance

2010 年东北地区西北部、祁连山南部和青藏高原地区中部年均气温较低, 两广地区和云南西南地区年均气温较高, 年均气温整体呈现出自西北向东南增加的趋势。普通克里格的交叉验证结果( 如图 4 所示) 的平均误差为 0.065 4, 均方根误差为 2.418 5, 标准平均值( Mean Standardized) 接近于 0, 平均标准误差( Average Standard Error) 接近于均方根预测误差( Root-Mean-Square), 标准均方根预测误差( Root-Mean-Square Standardized) 接近于 1, 均方根误差相对于其他空间插值方法最小。普通克里格法的插值结果呈现出明显的变化趋势, 利用样本点的估算灵敏度和极值效应较小。

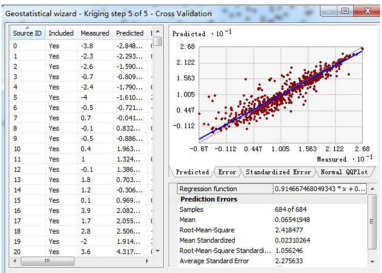


图 4 普通克里格法交叉验证结果

Fig.4 Cross validation results of ordinary Kriging

## 2.2 全国年均气温的预测表面模型

本研究利用 ArcGIS 的 Geostatistical Analyst 模块下 Explore Data 的 Trend Analysis 功能进行全局趋势分析。通过不断调整视角,分析结果(如图 5 所示)表明 2010 年全国年均气温数据在西北方向和东南方向具有微弱的 U 形趋势,而东北方向和西南方向基本不具有任何趋势,但该方向上中部地区的年均气温较高,而西部和东部年均气温相对较低。

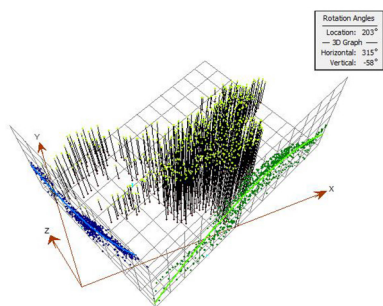


图 5 趋势面分析图

Fig.5 Trend surface analysis diagram

## 2.3 全国年均气温的空间变异规律

对比空间插值结果,克里格插值法的均方根误差相对于其他空间插值方法最小,该方法利用样本点的估算灵敏度和极值效应较小,插值结果能较好地呈现出明显的变化趋势。本研究选用克里格插值法对全国年均气温的空间变异规律进行分析,东北地区西北部、祁连山南部和青藏高原地区中部年均气温较低且部分地区年均气温低于  $0^{\circ}\text{C}$ ,两广地区和云南西南地区年均气温较高,四川东部也存在一个明显的高温区,年均气温整体呈现出自西北向东南增加的趋势。

## 3 结束语

本研究利用 2010 年全国 660 个气象台站的年均气温观测资料,较为系统地分析比较了各种方法插值结果之间的异同。对比空间插值结果,样条函数法的平均误差最小,其次为反距离权重法,克里格插值法相对较大;克里格插值法的均方根误差相对于其他空间插值方法最小,该方法利用样本点的估算灵敏度和极值效应较小,插值结果能较好地呈现出明显的变化趋势,该年均气温空间分布情况更接近实际。结果表明,普通克里格法的插值效果最好,较真实地反映了 2010 年全国的年均气温空间

分布规律,反距离权重法次之,张力样条函数法较差。

空间方法是研究区域变量空间分布的基本方法,各种方法都有其特定假设、适用范围、算法和优缺点,对于众多的空间方法而言,一种“包插百量”的最优空间法是不存在的,对于不同的空间变量,在不同的地域和不同的时空尺度内所谓的“最优”法是相对的,因此,后期仍需不断改进完善本研究的气象要素空间插值方法。

## 参考文献:

- [1] 孙俊,潘玉君,和瑞芳,等.地理学第一定律之争及其对地理学理论建设的启示[J].地理研究,2012,31(10):1749-1763.
- [2] 许民,王雁,周兆叶,等.长江流域逐月气温空间插值方法的探讨[J].长江流域资源与环境,2012,21(3):327-334.
- [3] 彭彬,周艳莲,高苹,等.气温插值中不同空间插值方法的适用性分析——以江苏省为例[J].地球信息科学学报,2011,13(4):539-548.
- [4] 万龙,马芹,张建军,等.黄土高原降雨量空间插值精度比较——KRIGING 与 TPS 法[J].中国水土保持科学,2011,9(3):79-87.
- [5] 金君,彭思岭,刘启亮,等.中国陆地区域气象要素空间插值方法比较研究[J].工程勘察,2010,38(11):48-51.
- [6] 林德生,吴昌广,周志翔,等.三峡库区近 50 年来的气温变化趋势[J].长江流域资源与环境,2010,19(9):1037-1043.
- [7] 马占山,张强,秦琰琰.三峡水库对区域气候影响的数值模拟分析[J].长江流域资源与环境,2010,19(9):1044-1052.
- [8] 储少林,周兆叶,袁雷,等.降水空间插值方法应用研究——以甘肃省为例[J].草业科学,2008(6):19-23.
- [9] 李军,游松财,黄敬峰.中国 1961—2000 年月平均气温空间插值方法与空间分布[J].生态环境,2006(1):109-114.
- [10] 方书敏,钱正堂,李远平.甘肃省降水的空间内插方法比较[J].干旱区资源与环境,2005,19(3):47-50.
- [11] 朱会义,刘述林,贾绍凤.自然地理要素空间插值的几个问题[J].地理研究,2004,23(4):425-432.
- [12] 林忠辉,莫兴国,李宏轩,等.中国陆地区域气象要素的空间插值[J].地理学报,2002,57(1):47-56.

[编辑:刘莉鑫]

(上接第 166 页)

- [5] 李大伟,李建成,团文征.利用卫星测高与验潮站数据监测越南近海海平面变化[J].测绘通报,2017(6):1-4.
- [6] 陈虹颖,徐峰,李晓惠,等.近 65 年 ENSO 事件强度变化及时频特征研究[J].热带气象学报,2017,33(5):683-694.
- [7] 李晓燕,翟盘茂. ENSO 事件指数与指标研究[J].气象学报,2000,58(1):102-109.
- [8] 赵永平,陈永利.一百多年来 ENSO 事件分类和 ENSO 循环研究[J].海洋湖沼通报,1998(3):7-12.

- [9] 刘雪源,刘玉光,郭琳,等.  $30^{\circ}\text{N}$  两侧东海海平面的低频变化及其与 ENSO 的关系[J].大地测量与地球动力学,2009,29(4):55-63.
- [10] TORRENCE C, WEBSTER P J. Interdecadal changes in the ENSO-Monsoon system[J]. J Clim, 1999, 12(8):2679-2690.
- [11] 赵小阳,李建成,王正涛,等.利用卫星测高技术监测厄尔尼诺和拉尼娜现象[J].海洋测绘,2007,27(1):41-44.

[编辑:张曦]